

**О.И. Сахненко, асс.**

*Одесский государственный экологический университет*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИТОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ Г.ОДЕССА

*Используя комплекс численных гидродинамических моделей ветро-волновой циркуляции вод и перемещения донного материала в прибрежной зоне моря, проведено численное моделирование зон размыва и аккумуляции песка при прохождении штормов над пляжными акваториями г.Одесса.*

**Ключевые слова:** зоны эрозии дна, одесское побережье, литодинамические процессы.

**Введение.** Попытки адекватно описать ветро-волновую динамику вод и наносов в районе берегозащитных сооружений сводятся, как правило, к детализации процессов путем уменьшения пространственного шага расчетной сетки модели [1, 2]. В [1] морфодинамическая модель береговой зоны, включающая модули расчета ветрового волнения, течений (трехмерная модель циркуляции) и морфодинамический модуль использовалась в режиме диагноза для моделирования циркуляции вод и наносов с высоким пространственным разрешением в районе евпаторийских причалов. Расположенные в прибрежных районах г. Одесса волноломы представляют собой расчетные инженерные конструкции, трансформирующие волну определенным образом. Для правомерного описания динамических процессов, протекающих в районе их расположения, необходим также учет влияния конструкции и формы берегозащитного сооружения на волновую динамику. На сегодняшний день практически отсутствуют работы по совместному моделированию волн, течений и перемещения донного материала в прибрежной рекреационной зоне г.Одесса. В предыдущих работах [3-5] приведены результаты исследований ветрового волнения и циркуляции вод, выполненные методом совместного моделирования природных процессов на прибрежных акваториях г.Одесса. Одной из подзадач обоснования реконструкции существующих волноломов в прибрежных акваториях г.Одессы является численный расчет литодинамики с учетом берегозащитных сооружений [3]. **Цель данной работы** - проведение анализа морфодинамических процессов, протекающих на прибрежных акваториях г.Одесса при прохождении штормов. Предложен и адаптирован к условиям одесских пляжных акваторий комплекс численных моделей для совместного описания гидро- и литодинамических процессов в прибрежной зоне с учетом влияния уклонов дна на перемещение донного материала, конструкции волноломов а также неразрывности границ берегозащитных сооружений.

**Методы исследования.** Гидро- и литодинамические блоки совместной модели прибрежной ветро-волновой циркуляции вод. Ветро-волновая циркуляция вод в прибрежной зоне моря описывается осредненными по глубине и периоду ветровых волн уравнениями Рейнольдса [5]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) - \frac{1}{\rho h} (\tau_{wx} - \tau_{0x}) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - f_0 V = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{1}{\rho h} \left( \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \right) - \frac{1}{\rho h} (\tau_{wy} - \tau_{0y}) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + f_0 U = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial(Uh)}{\partial x} + \frac{\partial(Vh)}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

где оси  $x$  и  $y$  направлены, соответственно, во вдольбереговом и поперечном направлениях;  $t$  – время;  $U$  и  $V$  – осредненные по глубине компоненты вектора скорости течений по осям  $x$  и  $y$ , соответственно;  $\xi$  – возвышение уровня свободной поверхности;  $h = h_0 + \xi$  – локальная глубина;  $h_0$  – расстояние от дна до некоторой поверхности отсчета, характеризующей невозмущенный уровень водоема;  $\rho$  – средняя плотность воды;  $f_0$  – параметр Кориолиса;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\tau_{wx}$  и  $\tau_{wy}$  – компоненты тангенциальных напряжений ветра на свободной поверхности.

Турбулентные напряжения потока  $\tau_{xy}$  представляются в виде

$$\tau_{xy} = \rho \left( \varepsilon_x \frac{\partial V}{\partial x} - \varepsilon_y \frac{\partial U}{\partial y} \right), \quad (4)$$

где  $\varepsilon_x = const$  – коэффициент турбулентного обмена во вдольбереговом направлении;  $\varepsilon_y$  – коэффициент турбулентного обмена в поперечном направлении, значение которого определяется аналогично [6]

$$\varepsilon_y = \frac{h_b^2 g T}{4 \pi^2 h} \sin^2 \alpha. \quad (5)$$

Здесь  $h_b$ ,  $T$ ,  $\alpha$  – высота, период и угол подхода ветровых волн к берегу, соответственно.

Поток импульса при обрушении ветровых волн учитывают компоненты волновых радиационных напряжений. Пространственные и временные флуктуации радиационных напряжений создают силы, которые вызывают волновые течения.

$S_{xx}$ ,  $S_{xy}$ ,  $S_{yy}$  – компоненты волновых радиационных напряжений, которые определяются следующим образом [7]:

$$\begin{aligned} S_{xx} &= \frac{1}{8} \rho g h_b^2 (n \cos^2 \alpha + n - 1/2), \\ S_{xy} &= \frac{1}{8} \rho g h_b^2 (n \sin \alpha \cos \alpha), \\ S_{yy} &= \frac{1}{8} \rho g h_b^2 (n \sin^2 \alpha + n - 1/2), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $n = \frac{1}{2} + \frac{K_w h}{sh 2K_w h}$ ,  $K_w = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\lambda$  – длина ветровых волн.

Компоненты тангенциальных напряжений потока у дна  $\tau_{0x}$  и  $\tau_{0y}$  представлены в соответствии с [8]:

$$\begin{aligned} \tau_{0x} &= \rho k_1 U \left[ (U + u_0 \sin \alpha)^2 + (V + u_0 \cos \alpha)^2 \right]^{1/2}, \\ \tau_{0y} &= \rho k_1 V \left[ (U + u_0 \sin \alpha)^2 + (V + u_0 \cos \alpha)^2 \right]^{1/2}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$k_1 = \frac{g}{c^2} \left[ 1 + \left( \frac{f C_1^2}{2g} \right)^{1/2} \right], \quad (8)$$

$$\frac{C_1}{\sqrt{g}} = 2.5 R \ln \left[ 1 + \frac{4h}{d_{cp}} \right], \quad (9)$$

где  $f = 2u_{*m}^2 / u_m^2$ ,  $u_m = \pi h_b / (T sh K_w h)$ ,  $u_0 = (2/\pi)u_m$ ,  $d_{cp}$  – средний диаметр донных наносов;  $u_{*m}^2$  – амплитуда придонных тангенциальных напряжений в волновом потоке, значение которой определяется в соответствии с [9].  $R$  – параметр задачи, определяемый в процессе калибровки модели.

На жидких границах задавались составляющие вектора скорости вдольберегового течения, рассчитанные на крупномасштабной сетке по модели [10], соответствующие силе восточного ветра 14 м/с. На твердой границе принималось условие  $U = V = 0$ .

Численные методы решения исходных уравнений приводятся в [11]. С целью корректной аппроксимации градиентов волновых радиационных напряжений в районе берегозащитных сооружений, при их расчете реализована неявная схема 1-го порядка точности.

Для расчета распространения взвешенных наносов в морской среде использовалось уравнение переноса в неконсервативной форме

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(hUC)}{\partial x} + \frac{\partial(hVC)}{\partial y} - K_L \left( \frac{\partial[h\partial C/\partial x]}{\partial x} + \frac{\partial[h\partial C/\partial y]}{\partial y} \right) = E, \quad (10)$$

где  $C$  – массовая концентрация взвеси ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ),  $E = \frac{d(Ch)}{dt}$  – локальный поток взвешенных частиц со дна, обусловленный процессами турбулентного взмучивания и гравитационного осаждения взвеси,  $K_L$  – коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии взвеси. Величина  $E$  связана с интегральной по глубине равновесной концентрацией взвеси  $C_e$  соотношением

$$E = w_g (C_e - C),$$

где, согласно [12],

$$C_e^* = 0.015 d_{cp} T_*^{1.5} D_*^{-0.3} / z_{0b}; \quad T_* = \tau_{b0} / \tau_{cr} - 1; \quad D_* = d_{cp} [g(\rho_c / \rho - 1) / v^2]^{1/3}.$$

$$\text{Тогда } C_e = \left[ \int_{z_{0b}}^h C_e^* \exp(-2bz/h) dz \right] / h = \frac{C_e^*}{2b} \left( \exp(-2b \frac{z_{0b}}{h}) - \exp(-2b) \right),$$

при условии [13], что  $b = 5w_g / u_*$ .

Здесь  $C_e^*$  – равновесная концентрация взвеси у дна ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ),  $z_{0b}$  – параметр шероховатости дна,  $w_g$  – гравитационная скорость осаждения частиц, рассчитываемая как  $w_g = g d_{cr}^2 \Delta \rho (18\nu \rho_0)^{-1}$ , ( $\Delta \rho = \rho_c - \rho_0$ , где  $\rho_0$  – плотность морской воды,  $\nu$  – коэффициент молекулярной вязкости воды,  $T_*$  – параметр транспортирующей способности потока,  $D_*$  – седиментационный диаметр,  $\rho_c, \rho$  – плотности взвешенных частиц и суспензии соответственно,  $\tau_{b0} = \sqrt{\tau_{0x}^2 + \tau_{0y}^2}$  – эффективное напряжение донного трения, обусловленное совместным действием волн и течений,  $\tau_{cr}$  – критическое напряжение донного трения, при котором частицы отрываются от дна, рассчитываемое по методике Ван- Рейна:

$$\tau_{cri} = \rho g d_{cp} (\rho_c / \rho - 1) \theta_{cri},$$

$$\begin{aligned}\theta_{cri} &= 0.24 D_*^{-1} K \text{ при } D_* < 4, \\ \theta_{cri} &= 0.14 D_*^{-0.64} K \text{ при } 4 < D_* \leq 10, \\ \theta_{cri} &= 0.04 D_*^{-0.1} K \text{ при } 10 < D_* \leq 20, \\ \theta_{cri} &= 0.013 D_*^{0.29} K \text{ при } 20 < D_* \leq 150, \\ \theta_{cri} &= 0.55 K^3 \text{ при } 150 < D_*.\end{aligned}$$

При решении уравнения (10) на боковых границах расчетной области принималось условие

$$\frac{dC}{d\vec{n}} = 0,$$

где  $\vec{n}$  - вектор внешней нормали к контуру области.

Для расчета векторов расхода взвешенных  $\vec{q}_s$  и донных  $\vec{q}_b$  наносов использовались следующие зависимости [2]:

$$\begin{aligned}\vec{q}_s &= \vec{V} C, \\ \vec{q}_b &= 0.053 \left( \left( \frac{\rho_c}{\rho} - 1 \right) g \right)^{0.5} d_{cp}^{1.5} T_*^{2.1} D_*^{-0.3} \vec{V} / |\vec{V}|,\end{aligned}$$

где  $\vec{V}$  - вектор скорости течения.

Общий расход наносов определяет массу твердого материала, переносимого на единицу длины в единицу времени во взвешенном состоянии и в результате влечения потоком.

Изменение отметок дна во времени  $\partial\eta/\partial t$  определялось процессами локального размыва и седиментации

$$\frac{\partial\eta}{\partial t} = -\frac{1}{1-\varepsilon} (E - \vec{\nabla} \vec{q}_b),$$

где  $\varepsilon$  - коэффициент пористости донного грунта.

После определения компонент удельного расхода влекомых наносов, входящих в уравнение деформации дна, проводилась их коррекция, основанная на введении поправочных множителей [14]. Эти множители учитывали влияние уклонов дна и неразмываемость верхней границы берегозащитного сооружения. Используемые формулы коррекции, предложенные Дельфтским университетом, имеют вид [14]:

$$\begin{aligned}\tilde{q}_{bx} &= b_{1x} b_2 q_{bx}, & \tilde{q}_{by} &= b_{1y} b_2 q_{by}, \\ b_{1x} &= 1 + s_1 \frac{\partial h}{\partial x}, & b_{1y} &= 1 + s_1 \frac{\partial h}{\partial y}, \\ b_2 &= \left\{ \begin{array}{ll} 1 & \text{при } \eta_b \geq 1 \\ \eta_b(2 - \eta_b) & \text{при } \eta_b < 1 \end{array} \right\}, & \eta_b &= \frac{-h}{s_2(h + \zeta)}.\end{aligned}$$

В этих выражениях  $s_1 = 0,5$  и  $s_2 = 10$  - эмпирические константы.

Коэффициенты  $b_1$  и  $b_2$  учитываются при расчете потоков наносов над подводным волноломом, который сложен из неразмываемого материала.

Для полноты описания гидродинамических процессов в прибрежной зоне моря использовались следующие виды моделей: эволюции параметров ветрового волнения, ветро-волновой динамики вод и перемещения наносов на мелководье. Каждая модель применялась для решения своей частной задачи, но, в целом, эти модели позволяют достигнуть конечный результат за счет того, что гидродинамическая модель использует в качестве исходной информации результаты, полученные с помощью модели трансформации волнения. В качестве блока расчета ветрового волнения выступает спектральная модель SWAN третьего поколения, основанная на решении уравнения баланса волновой энергии. Пространственные поля средней высоты, длины, периода ветровых волн, рассчитанные с учетом трансформации и обрушения волн на берегозащитных сооружениях заданной формы и конструкции [1], используются в качестве входной информации для гидродинамического блока комплекса. Решение уравнений гидро- и литодинамического блоков модели осуществлялось совместно, при обмене информацией о составляющих средней скорости течения и изменяющихся глубинах водоема.

**Условия проведения численных экспериментов.** Рассчитывалась интенсивность аккумуляции наносов и размыва дна на акватории типового одесского пляжа [3] с различными конструкциями берегозащитных сооружений при штормовых ветрах длительностью до 6ч. Изначально максимальные отметки глубин на участках от берега до волнолома, приведенные к нулю Балтийской системы, варьировали от 2.5м до 3.0 м. Расчетная область пляжной акватории ограничивалась перпендикулярными к берегу бунами [3].

Моделировался подход ветровых волн по нормали к линии волнолома. Поток минеральной взвеси в водную толщу со дна при ветро-волновом взмучивании намного превышает фоновую концентрацию взвеси во вдольбереговом потоке за волноломом. Поэтому на рассматриваемых интервалах времени вдольбереговым потоком осадков через боковые границы расчетной области можно пренебречь.

Средний диаметр частиц, слагающих донные грунты, полагался равным 0.00017м, плотность частиц  $2600 \text{ кг/м}^3$ , размеры неровностей дна – 0.03 м, пористость грунтов – 0.4. Коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии примеси  $K_L = 10 \text{ м}^2/\text{с}$ .

**Анализ результатов моделирования литодинамических процессов в прибрежных акваториях г.Одесса.** В результате проведенных расчетов была получена пространственная картина протекающих на исследуемом участке прибрежной зоны абразионно-аккумулятивных процессов, характерной чертой которых является наличие чередующихся очагов размыва в зонах с повышенными значениями скоростей течений и аккумуляции наносов – в зонах ослабления течений [3].

**Свободный водообмен пляжной акватории с морем.** В случае свободного водообмена и незащищенности пляжа от воздействия подходящих по нормали к берегу ветровых волн, происходит типичное для незащищенных от волнения акваторий переформирование берегового профиля. Над береговой отмелью дно претерпевает размыв с последующим выносом песка в сторону моря и его аккумуляцией на прибрежном мелководье (рис. 1а, 2а). В результате эрозии под действием обрушающихся ветровых волн и индуцируемых ими течений, береговая черта наступает на сушу с аккумуляцией песка непосредственно за зоной размыва узкой береговой полосы. Как известно, по истечении определенного времени после шторма береговой профиль возвращается в равновесное состояние [5].

**Сплошная стенка волнолома.** Расчеты показали, что в этом случае между берегом и волноломом во время шторма развиваются в основном аккумуляционные процессы (рис.1в). Над узкой береговой полосой, с внешней морской стороны

волнолома, а также на участках, примыкающих к молам, сосредоточены зоны размыва дна. Под действием волн и течений со скоростями, превышающими неразмывающие значения, происходит взмучивание донного материала и последующий его перенос течениями. Накоплению донных осадков с внутренней стороны волнолома способствует ослабление течений [3]. Тенденции обмеления участка акватории между волноломом и берегом имеют место в реальных условиях и более четко проявляются, когда волны распространяются по нормали к берегу [11].

**Стенки волноломов разделены проломами.** При наличии в волноломе двух проломов 10-метровой длины произойдет усиление проточности вод прибрежной акватории [2,3]. Отмечается некоторое усиление «неустойчивости» береговой зоны (рис.1б, 2б) по сравнению со случаем сплошной стенки. Вследствие увеличения динамической активности вод происходит более интенсивное перераспределение песка в пределах ограниченной волноломами акватории.

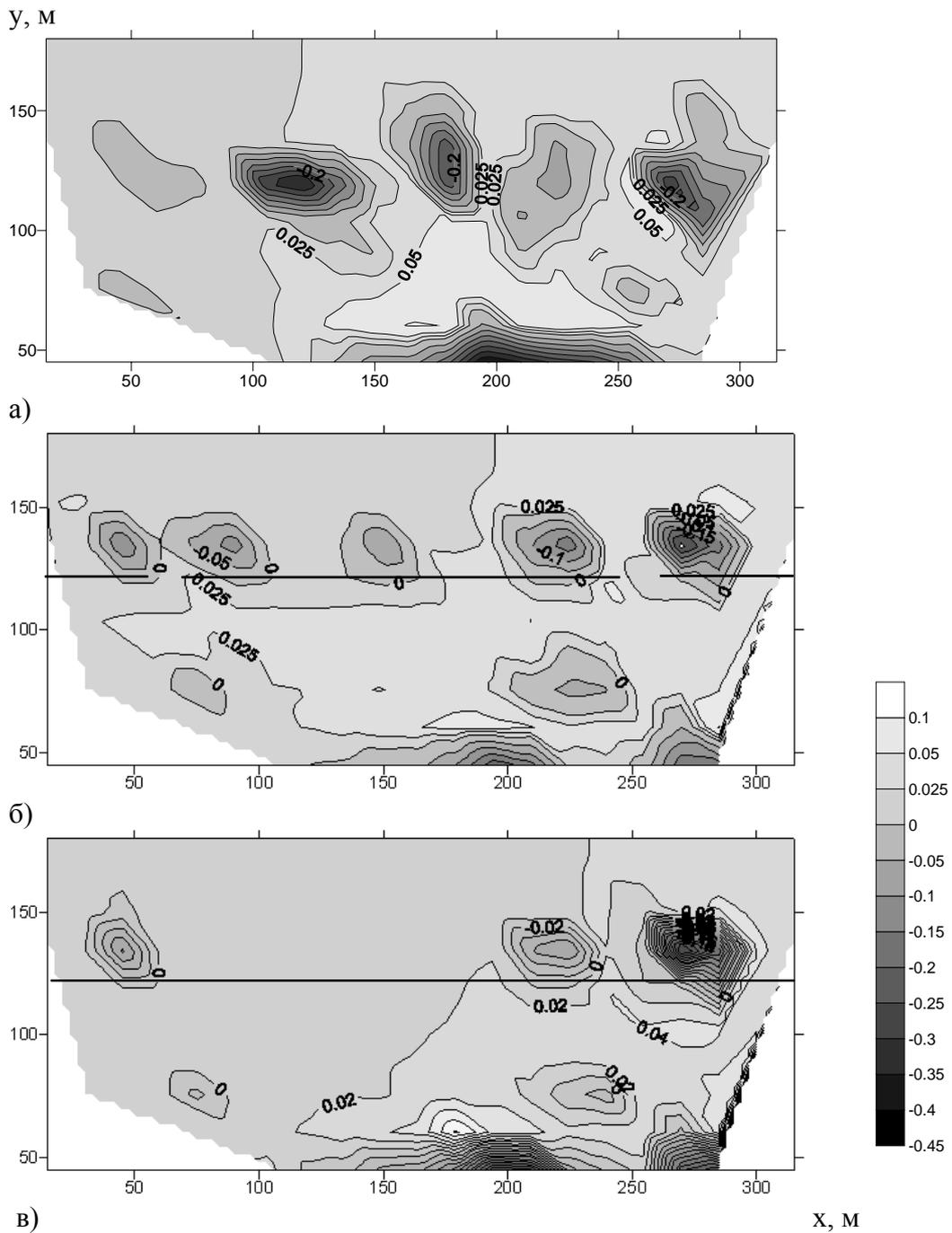
Вследствие усиления проточности и увеличения скоростей течения возможно образование дополнительных зон размыва с внешней морской стороны волнолома после проведения его реконструкции (рис.3). С внешней морской стороны волноломов орбитальные скорости волновых движений у дна достигают 70 см/с [1], что приводит к размыву дна (рис. 1б, 2б). При реализации варианта реконструкции волнолома в виде 2-х отверстий 10-метровой длины дополнительного размыва узкой береговой полосы, по сравнению со случаем сплошной стенки, не произойдет (рис.3). На участке от волнолома до узкой береговой полосы отмечается сопутствующее дополнительному размыву расширение зон аккумуляции. С появлением проломов в волноломе активизируются процессы переноса и осаждения взвешенного песка с внутренней стороны волнолома и в центральной части акватории, защищенной от воздействия ветровых волн (рис.3). После прохождения шторма длительностью 6 ч слой аккумуляции на отдельных участках акватории превышает соответствующие значения случая сплошной стенки волнолома на 6 см.

Максимальные величины размыва после 3 часов действия шторма могут достигать 41, 34 и 30 см на граничных с бунами и волноломами участках, соответственно при отсутствии волнолома, чередующихся стенках и сплошном волноломе.

Формирование локальных вихревых структур на участках, примыкающих к отверстиям в волноломе, будет препятствовать выносу песка за пределы пляжа. Кроме того, известным является тот факт [11], что донные бороздины или подводные каналы, ось которых ориентирована поперек береговой зоны, в условиях нормального к берегу подхода ветровых волн, не будут заноситься и менять свое местоположение за счет того, что динамическая ось разрывных течений будет совпадать с геометрической осью подводного канала, или, в данном случае, пролома.

Интегрирование по площади акватории слоев размыва и аккумуляции песка после прохождения моделируемого шторма показало, что, как и в случае сплошной стенки, над береговой отмелью аккумуляционные процессы преобладают над эрозионными.

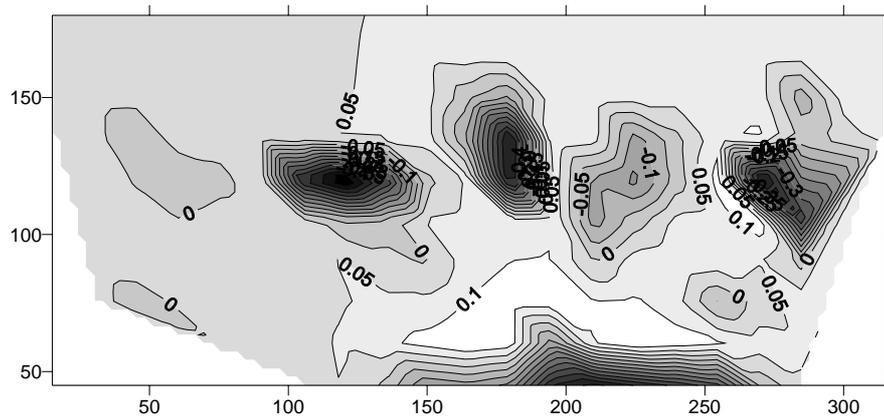
Проведенные эксперименты показывают, что комплекс моделей позволяет оценить особенности морфодинамических процессов в береговой зоне моря в условиях зарегулированного режима наносов, отражает тенденции обмеления участка акватории между волноломом и берегом, и может использоваться для прогноза эволюции динамики береговой зоны в результате антропогенных воздействий.



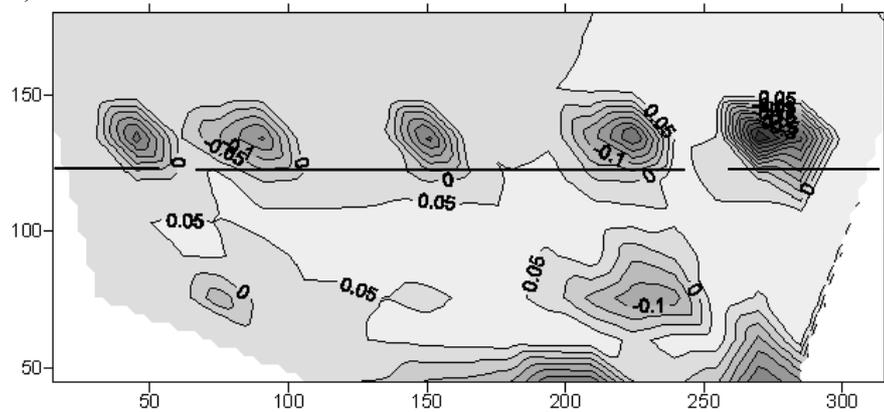
$y=120$  – линия расположения волнолома

Рис.1 - Деформации дна акватории типового одесского пляжа, м, под действием восточного ветра и волнения после 3 ч действия шторма (шаг по осям - 15 м) при свободном водообмене с морем (а); стенках волноломов, разделенных 10-метровыми проломами (б); сплошной стенке волнолома (в).

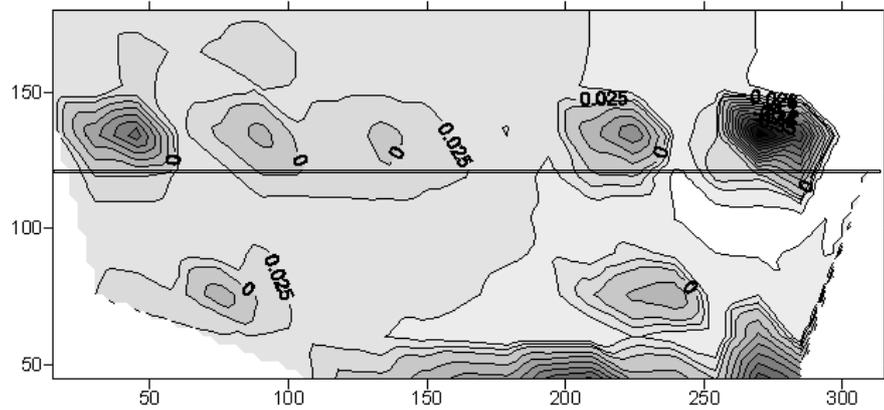
у, м



а)

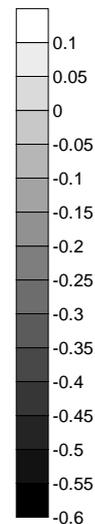


б)



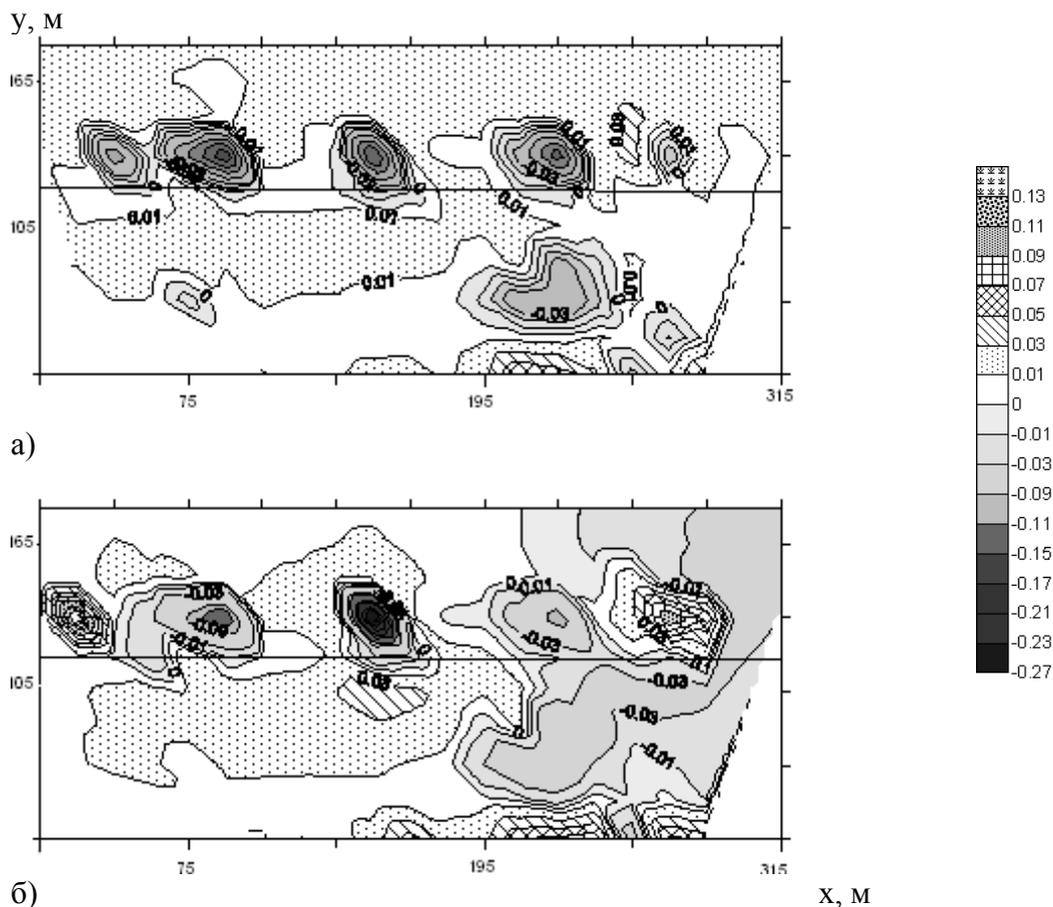
в)

х, м



$y=120$  – линия расположения волнолома

Рис.2 - Деформации дна акватории типового одесского пляжа, м, под действием восточного ветра и волнения после 6 ч действия шторма (шаг по осям - 15 м) при свободном водообмене с морем (а); стенках волноломов, разделенных 10-метровыми проломами (б); сплошной стенке волнолома (в).



$y=120$  – линия расположения волнолома

Рис.3 – Абсолютная разность изменения отметок дна  $sloy1-sloy2$  на акватории типового одесского пляжа в случаях наличия в волноломе 2-х отверстий 10- м длины ( $sloy1$ ) и сплошной стенки волнолома ( $sloy2$ ) через 3 ч (а) и 6 ч (б) действия шторма (шаг по осям  $x$  и  $y$  - 15 м).

**Выводы.** В результате совместного моделирования течений и литодинамики прибрежной зоны, рассмотрен характер морфодинамических изменений на пляжных акваториях г.Одессы при прохождении штормов различной длительности. При наличии волноломов происходит аккумуляция взвешенного ветровыми волнами песка в ограниченных волноломами прибрежных бассейнах г.Одессы. С внешней морской стороны волноломов, где орбитальные скорости волновых движений у дна достигают максимальных для прибрежного мелководья значений, происходит, в основном, размыв дна. Реконструкция в виде 10-метровых проломов будет сопровождаться более интенсивным перераспределением донного материала в пределах ограниченных берегозащитными сооружениями акваторий. С появлением проломов в волноломе, во время штормов активизируются процессы осаждения взвешенного волнами песка с внутренней стороны волнолома и в центральной части акватории, защищенной от воздействия ветровых волн. Как показали результаты численного моделирования, при прохождении шторма над акваторией с двумя отверстиями 10-метровой длины в волноломе, дополнительного размыва береговой полосы, по сравнению со случаем сплошной стенки, не происходит. В случае свободного водообмена одесской пляжной акватории с морем, во время шторма дно над береговой отмелью претерпевает размыв с последующим выносом песка и его аккумуляцией на прибрежном мелководье.

## Список литературы

1. Иванов В.А., Фомин В.В. Математическое моделирование динамических процессов в зоне море-суша. – Севастополь, 2008. – 364 с.
2. Иванов В.А. Проблемы и перспективы оценок воздействия на окружающую среду при освоении ресурсов шельфа. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ - Гидрофизика», 2004. – 295 с.
3. Тучковенко Ю. С., Сахненко О. И. Моделирование трансформации ветровых волн в прибрежной зоне моря при различных вариантах реконструкции волнолома //Український гідрометеорологічний журнал. – 2007. - №2. – С. 175 – 185.
4. Тучковенко Ю. С., Сахненко О. И. Особенности динамики вод в прибрежной зоне г.Одессы и оценки водообновления при различных вариантах реконструкции волноломов // Екологія міст та рекреаційних зон: зб. наук. ст. –ІНВАЦ, 2008. – С.102-106.
5. Тучковенко Ю. С., Сахненко О. И. Комплексное моделирование динамики вод в прибрежной зоне моря при различных ветро-волновых условиях // Український гідрометеорологічний журнал. –2008. - №3 – С.202-213.
6. Блатов А.С., Иванов В.А. Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря.- Киев: Наукова Думка, 1992.- 242 с.
7. Krishna Kumar, C. S. Murty. Wave-induced nearshore circulation along the Calangute-Candolim beach, Goa, west coast of India // Proc. Indian Acad. Sci. - Vol.98. - No. 3. – 1989. - pp. 265-278.
8. Михинов А.Е. Транспортирующая и эрозионно-аккумулятивная способность волновых потоков в береговой зоне открытых водоемов//Управление вод. ресурсами суши: теория и практика.– 1989. – С. 136– 145.
9. Михинов А.Е. Транспорт донных наносов в волновых потоках// Моделирование гидрофизических процессов и полей в замкнутых водоемах и морях. – 1989. – С. 139-149.
10. Тучковенко Ю. С. Гидродинамическая модель для расчета трехмерной циркуляции и термохалинной структуры вод северо-западной части Черного моря // Метеорологія, кліматологія та гідрологія. – 2002. - № 45. – С.129-139.
11. Лонин С.А., Тучковенко Ю.С. Имитация сгонно-нагонных колебаний уровня моря в портах северо-западной части Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 1999.–С. 58-66.
12. Иванов В.А., Михинов А.Е., Лукьянов Ю.П., Баклановская В.Ф., Чечель И.И., Ковешников Л.Л. Динамика наносов в прибрежной зоне южного берега Крыма.- Севастополь, 1993.- 37с. – (Препр. / МГИ АН Украины).
13. Динамика русловых потоков и литодинамика прибрежной зоны моря/ Под ред. В.К. Дебольского – М.: Наука, 1994. – 303 с.
14. Delft 3D –MOR : user manual / WL Delft Hydraulics – Netherlands, 2003. – 238 p.

### **Моделювання литодинамічних процесів в прибережній зоні м.Одеса. О.І.Сахненко**

*З використанням комплексу чисельних гідродинамічних моделей вітро-хвильової циркуляції вод та переміщення донного матеріалу в прибережній зоні моря виконано чисельне моделювання зон розмиву та акумуляції піску під час проходження штормів над пляжними акваторіями м.Одеси.*

**Ключові слова:** зони ерозії дна, одеське узбережжя, литодинамічні процеси.

### **Modeling of the litodynamical processes on the beach zone of Odessa city. O.I. Sakhnenko**

*Using the complex of the wave-wind circulation model and the bottom fraction transport model, the nearshore circulation of sand on the beach zone of Odessa city was calculated.*

**Keywords:** the bottom erosion zone, the Odessa beach zone, litodynamical processes.